

STEP 하중을 받는 래티스 돔 구조물의 동적 구조불안정 특성에 관한 연구

A Study on the Dynamic Instability Characteristics of Latticed Dome Under STEP Excitations

김 승 덕*
Kim, Seung-Deog

장 제 필**
Jang, Je-Pil

요 약

대공간 구조시스템의 하나인 스페이스 프레임 구조는 종횡의 부재가 3차원적으로 연결되어 입체적으로 외부 힘에 저항하는 구조로써 높은 강성을 갖는다. 또한 균등한 응력 분담이 가능하도록 설계되는 스페이스 프레임 고유의 역학적 특성에 기인하여 경량화가 가능하다. 스페이스 프레임의 구조안정 문제는 구조물의 여러 가지 조건에 따라 결정되며 매우 중요하다. 본 연구에서는 기하학적 형태에 따른 래티스 돔의 동적구조불안정 특성을 알아보기 위해 2-자유 절점 구조물을 통해 스페이스 프레임의 붕괴 메커니즘을 파악하고, 기하학적 형태에 따라 Star Dome, Parallel Lamella Dome, 3-Way Grid Dome을 모델로 선택하여 동일레벨의 주기성이 없는 STEP 하중에 의한 동적외력 하에서의 라이즈-스팬(μ)비 및 형상불완전에 따른 불안정 거동 특성을 알아본다.

Abstract

The space frame structure is one of the large span structural system consisting of longitudinal and latitudinal members. The members are connected in three dimension. A space frame structure has high stiffness with a structure resisting external forces in steric conformation. According to many structural conditions, structural stability problems in the space frame are determined and considered very important. This study seeks to understand the space frame collapse mechanism using the 2-free nodes truss model in order to examine static structural instability characteristics of the latticed dome. According to geometrical shape, the star dome, parallel lamella dome and three way grid dome were selected as models. The models were examined for characteristics of instability under STEP Excitations behavior according to rise-span ratio(μ) and shape imperfection.

키워드 : 스페이스 프레임, 래티스 돔, 초기불안정

Keywords : Space frame, Latticed dome, Initial imperfection

1. 서론

경량의 대공간을 만들기 위해 스페이스 프레임을 많이 이용한다. 스페이스 프레임은 다양한 접합 형식에 따라 전문 업체별로 구조시스템을 개발해 왔다. 그러나 대공간을 만들기 위해서는 형태저항형인

셸형으로 만들어야 하며, 이때 Snapping 문제를 대표로 하는 구조불안정 현상을 반드시 해결하여야 한다. 특히 경간이 커지면, 항시 미소 진동에 노출되어 있어 동적 붕괴 메커니즘이 보다 복잡하고 민감해 진다.

강성계 이산화 시스템인 스페이스 트러스 구조물은 축력만을 전달하는 대공간 구조물로서, 경제적이라는 장점과 함께 구조불안정이란 중요한 문제를 해결해야 한다. 구조불안정 문제의 중요한 특징은 초기형상조건에 매우 민감하게 반응한다는 것이다. 구

* 교신저자, 세명대학교. 건축공학과 교수, 공학박사

Tel : 043-649-1326 Fax : 043-649-1326

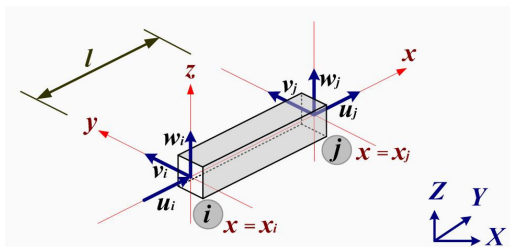
E-mail : sabinus@semyung.ac.kr

** 학생회원, 세명대학교 건설공학과, 석사과정

조안정 문제는 외력이 정적으로 작용할 때의 정적 불안정과 동적으로 작용할 때의 동적불안정 문제로 분류 할 수 있다. 정적불안정에서는 뿔좌굴과 분기 좌굴 등과 같은 불안정 거동이 나타나며, 동적불안정 문제에서는 뿔좌굴(Snap-through)은 직접좌굴(Direct Snapping)에, 분기좌굴(Bifurcation)은 간접좌굴(Indirect Snapping)에 각각 대응한다.^[4] 이러한 불안정 현상으로 인한 파괴 매커니즘의 파악은 구조설계에서 매우 중요하다. 특히 외력이 동적일 경우, snapping 현상의 매커니즘에 관한 연구는 아직 초기적 단계에 있는 실정이다.

2. 비선형 강성방정식에 의한 정식화

국소좌표계 (x, y, z) 및 전체좌표계 (X, Y, Z) 를 <그림1>과 같이 선택하였다.



<그림 1> 비선형 강성방정식 요소의 절점자유도와 좌표계

가상일의 원리를 이용하여 트러스부재의 절점하중과 절점변위관계를 나타내는 비선형방정식을 다음과 같이 나타낸다.

$$F = K_1 D_1 + K_2 D_2 + K_3 D_3 \quad (1)$$

식(1)에 관성력 및 감쇠력을 고려하면, 다음과 같은 비선형 운동방정식이 얻어진다.

$$M\ddot{D} + C\dot{D} + K_1 D_1 + K_2 D_2 + K_3 D_3 = F \quad (2)$$

여기서, M은 질량매트릭스, C는 비례감쇠 매트릭스이다.

3. 스텝하중을 받는 래티스 돔 구조물의 동적 구조불안정 특성

스페이스 프레임으로 대공간 구조물을 건립할 경우 구조물의 형태(Form), 규모(Scale), 경계(Boundary), 배열(Arrangement), 부재(Member)와 같은 여러 조건에 의해 구조안정 문제를 결정한다. 배열(Arrangement), 부재(Member)와 같은 조건은 연속체 쉘의 경우 찾아볼 수 없는 스페이스 프레임 고유의 요소로서 스페이스 프레임에 있어 매우 중요하다. 래티스 돔 구조물의 특성을 파악하기 위한 조건은 라이즈-스팬(μ)비와 형상불완전을 고려하여 수행한다. 형상불완전을 고려한 불안정 거동을 알아보기 위해 고유치 해석을 통해 1차 좌굴모드를 구하며, 초기불완전량은 각 모델의 2L값을 기준으로 0.1%의 불완전량을 적용한다. 부재 단면적은 모든 요소 내에서 일정하며, 물성치는 모두 동일한 탄성계수 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 와 밀도 $\rho = 7.85 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^3$ 를 가진다. 해석은 라이즈-스팬(μ)비와 형상불완전을 고려하여 수행한다. 본 논문은 수직 방향으로 동일 레벨의 주기성이 없는 STEP 하중에 의한 동적외력 하에서의 동적불안정현상을 분석한다. 감쇠정수(h) 0.0, 0.05로 하고, 형상불완전 값은 0.1%로 한다. 비선형 응답은 Newmark's β 법($\beta=1/4$)에 의해 수치해석 하였다. 여기서 각 모델의 고유 주기 T_0 에 대해, 시간간격을 $\Delta t = T_0/100$ 으로 지속 시간을 $50 T_0$ 로 하였다. 동적좌굴현상의 판정은 Budiansky-Roth에 의한 방법, 즉 미소한 외력증가에 대해 응답최대 변위 값이 급격히 증가하는 하중을 동적임계하중으로 채택한다. 각 모델의 라이즈-스팬(μ)비에 따라 정적좌굴하중(${}_s P_{cr}$)으로 표준화 한다.

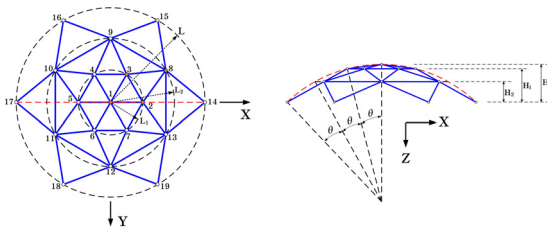
3.1 Star Dome 구조물의 구조불안정 특성

본 장에서는 Star Dome 구조물의 불안정 거동 특성을 알아보고자 한다. 라이즈-스팬(μ)비 및 하중 조건에 따른 불안정 거동을 파악하고, 형상불완전성을 고려하여 스페이스 프레임 구조물이 불안정 거

동과 민감함을 알아보고자 한다. 해석 대상 모델은 다 자유절점 공간 구조물인 Star Dome으로 많은 문헌에서 다루어진 모델이다. Star Dome 구조물형상은 <그림 2>와 같으며, 면 중심으로부터 동일한 각도 상에 존재한다. 해석 모델은 <표 1>과 같이 라이즈-스팬(μ)비에 따라 두 가지 모델 ST_1 과 ST_2 를 선택한다.

<표 1> Star Dome 구조물의 해석 모델

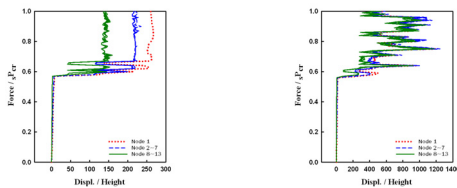
Model	L1	L2	H	H1	H2	μ	θ	$L_{tot}(m)$
ST_1	338	171	100	89	55	0.1	7.5	99
ST_2	352	182	200	177	109	0.2	14.5	104



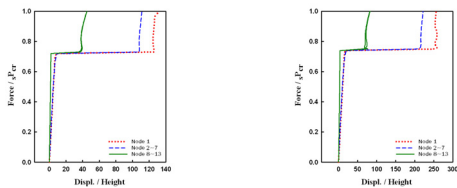
<그림 2> Star Dome 구조물의 형상

<표 2> Star Dome 구조물의 동적좌굴하중 (완전형상)

$\mu=0.1$		$\mu=0.2$	
h=0.0	h=0.05	h=0.0	h=0.05
0.57	0.72	0.56	0.74



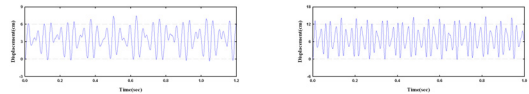
(a) $\mu=0.1$ (b) $\mu=0.2$
<그림 3> Star Dome 완전형상 h=0.0



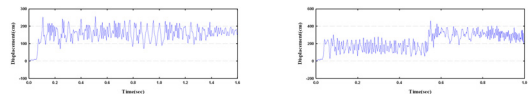
(a) $\mu=0.1$ (b) $\mu=0.2$
<그림 4> Star Dome 완전형상 h=0.05

STEP 하중을 받는 경우, 감쇠정수(h) 0.0, 0.05로 하고, 라이즈-스팬(μ)비는 0.1과 0.2로 변화시켜 각 하중레벨의 시각력곡선으로 부터 얻을 수 있는 최대 변위응답을 <그림 3>과 <그림 4>에 나타낸다. <표 2>는 좌굴하중레벨을 정적좌굴하중으로 규준화한 값이다. 비감쇠(h=0.0)일 경우 라이즈-스팬(μ)비에 따라 정적좌굴하중에 $\mu=0.1$ 는 57%이고 $\mu=0.2$ 일 때 56%이다. 그리고 감쇠(h=0.05)일 경우에 $\mu=0.1$ 는 72%이고, $\mu=0.2$ 는 74%이다. 따라서 직접좌굴 현상보다 간접좌굴 현상이 감쇠에 민감함을 보인다.

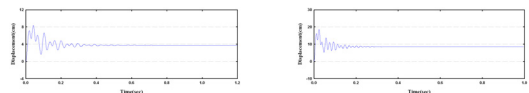
비선형 변위응답의 특성을 분석하기 위해 Pre-buckling 및 Post-buckling 레벨에서의 시각력 응답곡선을 비교한다. 라이즈-스팬(μ)비는 $\mu=0.10$ 과 $\mu=0.20$ 로 하고, 감쇠정수는 h=0.0과 h=0.05로 한다.



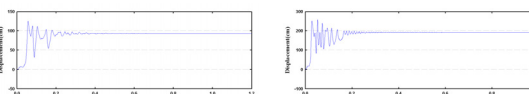
완전형상의 시각력 곡선 (비감쇠)
 ST_1 Pre-buckling (Load Level=0.57, $\mu=0.10$, h=0.0)
 ST_2 Pre-buckling (Load Level=0.56, $\mu=0.20$, h=0.0)



완전형상의 시각력 곡선 (비감쇠)
 ST_1 Post-buckling (Load Level=0.67, $\mu=0.10$, h=0.05)
 ST_2 Post-buckling (Load Level=0.69, $\mu=0.20$, h=0.05)



완전형상의 시각력 곡선 (감쇠)
 ST_1 Pre-buckling (Load Level=0.72, $\mu=0.10$, h=0.05)
 ST_2 Pre-buckling (Load Level=0.74, $\mu=0.20$, h=0.05)



완전형상의 시각력 곡선 (감쇠)
 ST_1 Post-buckling (Load Level=0.77, $\mu=0.10$, h=0.05)
 ST_2 Post-buckling (Load Level=0.85, $\mu=0.20$, h=0.05)

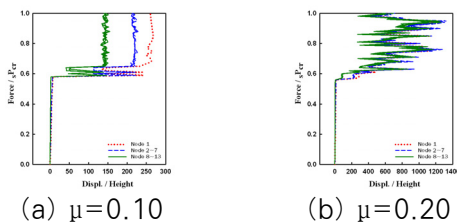
<그림 5> Star Dome 시각력 곡선

Pre-buckling일 경우 일정한 간격을 두고 규칙적인 패턴을 보이지만, Post-buckling일 경우에는 진폭이 한번 뛰면서 불규칙적인 패턴을 보인다. 라이즈-스팬(μ)비가 $\mu=0.20$ 인 경우가 $\mu=0.10$ 경우보다 조밀한 패턴을 보이고 절점의 높이가 낮을수록 조밀하고 불규칙적인 패턴을 보이는 것을 알 수 있다.

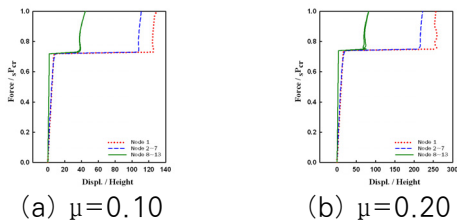
감쇠정수 $h=0.05$ 를 도입한 경우 감쇠의 효과로 인한 변위의 진폭이 감소함을 알 수 있다.

〈표 3〉 Star Dome 구조물의 동적좌굴하중 (Imperfection=0.1%)

$\mu=0.1$		$\mu=0.2$	
$h=0.0$	$h=0.05$	$h=0.0$	$h=0.05$
0.58	0.72	0.56	0.74



〈그림 6〉 Star Dome Imperfection 0.1% $h=0.0$



〈그림 7〉 Star Dome Imperfection $h=0.05$

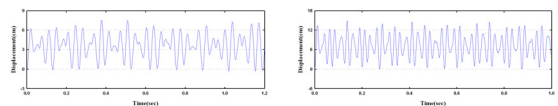
초기형상불완전성을 고려한 불안정 거동을 분석한다. STEP 하중을 받는 경우, 감쇠정수(h) 0.0, 0.05로 하고, 라이즈-스팬(μ)비 0.1과 0.2에 불안전량 0.1%를 도입하여 각 하중레벨의 시각력곡선으로 부터 얻을 수 있는 최대 변위응답을 <그림 6>과 <그림 7>에 나타낸다. <표 3>은 좌굴하중레벨을 정적좌굴하중으로 규준화 한 값이다. 비감쇠($h=0.0$)일 경우 라이즈-스팬(μ)비에 따라 정적좌굴하중에 $\mu=0.1$ 는 58%이고 $\mu=0.2$ 일 때 56%이다. 그리고 감쇠($h=0.05$)일 경우에 $\mu=0.1$ 는 72%이고, $\mu=0.2$ 는 74%이다. 따라서 직접좌굴 현상보다 간접좌굴 현상

이 감쇠에 민감함을 보인다.

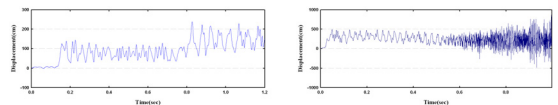
비선형 변위응답의 특성을 분석하기 위해 Pre-buckling 및 Post-buckling 레벨에서의 시각력응답곡선을 비교한다. 라이즈-스팬(μ)비는 $\mu=0.10$ 과 $\mu=0.20$ 로 하고, 감쇠정수는 $h=0.0$ 과 $h=0.05$ 로 한다.

Pre-buckling일 경우 일정한 간격을 두고 규칙적인 패턴을 보이지만, Post-buckling일 경우에는 진폭이 한번 뛰고 규칙적인 패턴을 보이고 두 번째 뛰었을 때 불규칙한 패턴을 보인다. 라이즈-스팬(μ)비가 $\mu=0.20$ 인경우가 $\mu=0.10$ 경우보다 조밀한 패턴을 보이고 절점의 높이가 낮을수록 조밀하고 불규칙적인 패턴을 보이고 있다.

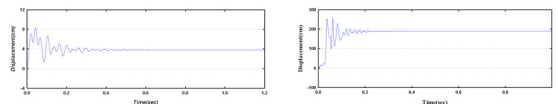
감쇠정수 $h=0.05$ 를 도입한 경우 감쇠의 효과로 인한 변위의 진폭이 감소함을 알 수 있다.



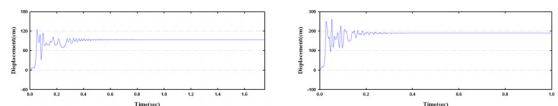
Imperfection 0.1%의 시각력 곡선 (비감쇠)
ST_1 Pre-buckling (Load Level=0.58, $\mu=0.10$, $h=0.0$)
ST_2 Pre-buckling (Load Level=0.56, $\mu=0.20$, $h=0.0$)



Imperfection 0.1%의 시각력 곡선 (비감쇠)
ST_1 Post-buckling (Load Level=0.65, $\mu=0.10$, $h=0.0$)
ST_2 Post-buckling (Load Level=0.75, $\mu=0.20$, $h=0.0$)



Imperfection 0.1%의 시각력 곡선 (감쇠)
ST_1 Pre-buckling (Load Level=0.72, $\mu=0.10$, $h=0.05$)
ST_2 Pre-buckling (Load Level=0.74, $\mu=0.20$, $h=0.05$)



Imperfection 0.1%의 시각력 곡선 (감쇠)
ST_1 Post-buckling (Load Level=0.80, $\mu=0.10$, $h=0.05$)
ST_2 Post-buckling (Load Level=0.85, $\mu=0.20$, $h=0.05$)

〈그림 8〉 Star Dome 시각력 곡선

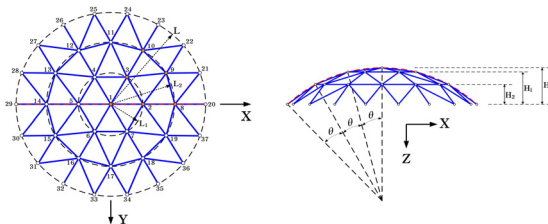
3.2 Parallel Lamella Dome 구조물의 구조불안정 특성

본 장에서는 Parallel Lamella Dome 구조물의 불안정 거동 특성을 알아본다. 라이즈-스팬(μ)비 및 하중조건에 따른 불안정 거동을 파악하고, 형상불안정성을 고려하여 스페이스 프레임 구조물이 불안정 거동과 민감함을 알아보려고 한다.

Parallel Lamella Dome 구조물의 형상은 <그림 9>와 같으며, 모델의 모든 절점은 구면상에 존재하며, 구면 중심으로부터 동일한 각도 상에 존재 한다. 해석 모델은 <표 5>와 같이 라이즈-스팬(μ)비에 따라 두 가지 모델 PL_1 과 PL_2 를 선택한다.

<표 4> Parallel Lamella Dome 구조물의 해석 모델

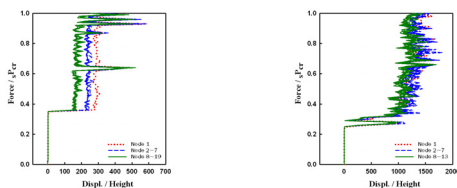
Model	L1	L2	H	H1	H2	μ	θ	L_{tot} (m)
PL_1	338	171	100	89	55	0.1	7.5	136
PL_2	352	182	200	177	109	0.2	14.5	145



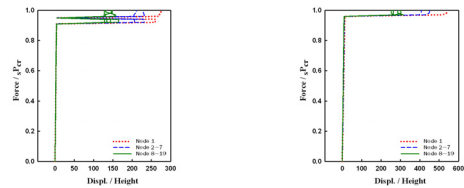
<그림 9> Parallel Lamella Dome 구조물의 형상

<표 5> Parallel Lamella Dome 구조물의 동적 좌굴하중비 (완전형상)

$\mu=0.1$		$\mu=0.2$	
$h=0.0$	$h=0.05$	$h=0.0$	$h=0.05$
0.35	0.91	0.24	0.96



(a) $\mu=0.1$ (b) $\mu=0.2$
<그림 10> Parallel Lamella Dome 완전형상 $h=0.0$



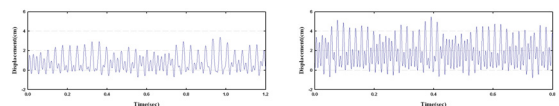
(a) $\mu=0.1$ (b) $\mu=0.2$
<그림 11> Parallel Lamella Dome 완전형상 $h=0.05$

STEP 하중을 받는 경우, 감쇠정수(h) 0.0, 0.05로 하고, 라이즈-스팬(μ)비는 0.1과 0.2로 변화시켜 각 하중레벨의 시각력 곡선으로 부터 얻을 수 있는 최대 변위응답을 <그림 10>과 <그림 11>에 나타낸다. <표 5>는 좌굴하중레벨을 정적좌굴하중으로 규준화 한 값이다. 비감쇠($h=0.0$)일 경우 라이즈-스팬(μ)비에 따라 정적좌굴하중에 $\mu=0.1$ 는 35%이고 $\mu=0.2$ 일 때 91%이다. 그리고 감쇠($h=0.05$)일 경우에 $\mu=0.1$ 는 24%이고, $\mu=0.2$ 는 96%이다. 따라서 직접좌굴 현상보다 간접좌굴 현상이 감쇠에 민감함을 보인다.

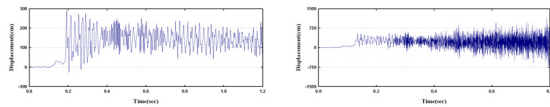
비선형 변위응답의 특성을 분석하기 위해 Pre-buckling 및 Post-buckling 레벨에서의 시각력 응답곡선을 비교한다. 라이즈-스팬(μ)비는 $\mu=0.10$ 과 $\mu=0.20$ 로 하고, 감쇠정수는 $h=0.0$ 과 $h=0.05$ 로 한다.

Pre-buckling일 경우 일정한 간격을 두고 규칙적인 패턴을 보이지만, Post-buckling일 경우에는 진폭이 한번 뛰고 규칙적인 패턴을 보이고 두 번째 뛰었을 때 불규칙한 패턴을 보인다. 절점의 높이에 따라서 각각 다른 패턴을 보이며 절점의 높이가 낮고 라이즈-스팬(μ)비가 높을수록 더욱 민감한 반응을 보인다.

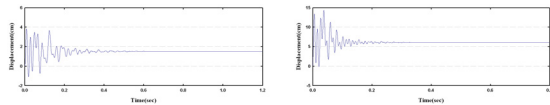
감쇠정수 $h=0.05$ 를 도입한 경우 감쇠의 효과로 인한 변위의 진폭이 감소함을 알 수 있다.



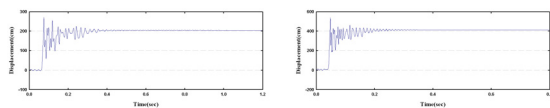
완전형상의 시각력 곡선 (비감쇠)
 PL_1 Pre-buckling (Load Level=0.35, $\mu=0.10$, $h=0.0$)
 PL_2 Pre-buckling (Load Level=0.24, $\mu=0.20$, $h=0.0$)



완전형상의 시각력 곡선 (비감쇠)
 PL_1 Post-buckling (Load Level=0.65, $\mu=0.10$, $h=0.0$)
 PL_2 Post-buckling (Load Level=0.45, $\mu=0.20$, $h=0.0$)



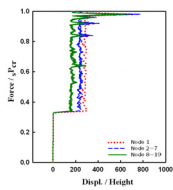
완전형상의 시각력 곡선 (감쇠)
 PL_1 Pre-buckling (Load Level=0.91, $\mu=0.10$, $h=0.05$)
 PL_2 Pre-buckling (Load Level=0.96, $\mu=0.20$, $h=0.05$)



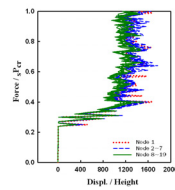
완전형상의 시각력 곡선 (감쇠)
 PL_1 Post-buckling (Load Level=0.97, $\mu=0.10$, $h=0.05$)
 PL_2 Post-buckling (Load Level=1.00, $\mu=0.20$, $h=0.05$)
 <그림 12> Parallel Lamella Dome 시각력 곡선

<표 6> Parallel Lamella Dome 구조물의 동적 좌굴하중비 (Imperfection 0.1%)

$\mu=0.1$		$\mu=0.2$	
$h=0.0$	$h=0.05$	$h=0.0$	$h=0.05$
0.34	0.89	0.24	0.92

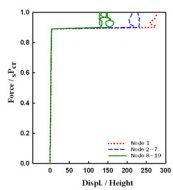


(a) $\mu=0.10$

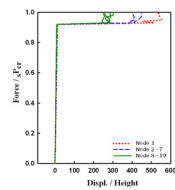


(b) $\mu=0.20$

<그림 13> Parallel Lamella Dome Imperfection 0.1% $h=0.0$



(a) $\mu=0.10$



(b) $\mu=0.20$

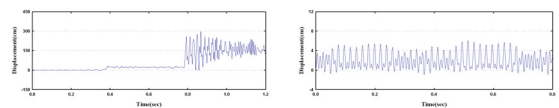
<그림 14> Parallel Lamella Dome Imperfection 0.1% $h=0.05$

초기형상불완전성을 고려한 불안정 거동을 분석한다. STEP 하중을 받는 경우, 감쇠정수(h) 0.0, 0.05로 하고, 라이즈-스팬(μ)비 0.1과 0.2에 불안전량 0.1%를 도입하여 각 하중레벨의 시각력 곡선으로부터 얻을 수 있는 최대 변위응답을 <그림 13>과 <그림 14>에 나타낸다. <표 6>은 좌굴하중레벨을 정적좌굴하중으로 규준화 한 값이다. 비감쇠($h=0.0$)일 경우 라이즈-스팬(μ)비에 따라 정적좌굴하중에 $\mu=0.1$ 는 33%이고 $\mu=0.2$ 일 때 89%이다. 그리고 감쇠($h=0.05$)일 경우에 $\mu=0.1$ 는 24%이고, $\mu=0.2$ 는 92%이다. 따라서 직접좌굴 현상보다 간접좌굴 현상이 감쇠에 민감함을 보인다.

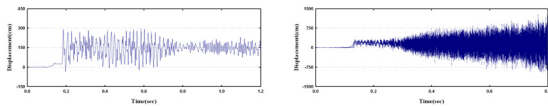
비선형 변위응답의 특성을 분석하기 위해 Pre-buckling 및 Post-buckling 레벨에서의 시각력 응답곡선을 비교한다. 라이즈-스팬(μ)비는 $\mu=0.10$ 과 $\mu=0.20$ 로 하고, 감쇠정수는 $h=0.0$ 과 $h=0.05$ 로 한다.

Pre-buckling일 경우 일정한 간격을 두고 규칙적인 패턴을 보이지만, Post-buckling일 경우에는 진폭이 한번 뛰고 규칙적인 패턴을 보이고 두 번째 뛰었을 때 불규칙한 패턴을 보인다. PL_1의 경우 Load Level이 0.34인 경우 일정한 패턴을 보이다가 진폭이 불규칙적인 것을 볼 수 있으며, PL_2의 Load Level이 0.24인 경우 불규칙한 패턴이지만 일정 구간마다의 일정한 패턴이 있다. Post-buckling인 경우 일정한 패턴을 보이지만 0.2초 후에 불규칙한 패턴을 보인다.

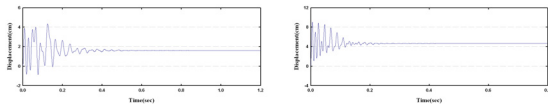
감쇠정수 $h=0.05$ 를 도입한 경우 감쇠의 효과로 인한 변위의 진폭이 감소함을 알 수 있다.



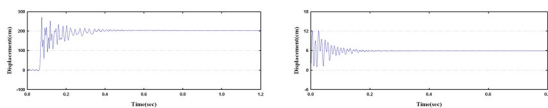
Imperfection 0.1%의 시각력 곡선 (비감쇠)
 PL_1 Pre-buckling (Load Level=0.34, $\mu=0.10$, $h=0.0$)
 PL_2 Pre-buckling (Load Level=0.24, $\mu=0.20$, $h=0.0$)



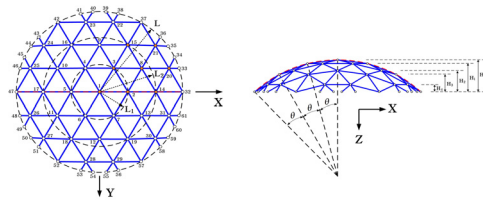
Imperfection 0.1%의 시각력 곡선 (비감쇠)
 PL_1 Post-buckling (Load Level=0.60, $\mu=0.10$, $h=0.0$)
 PL_2 Post-buckling (Load Level=0.50, $\mu=0.20$, $h=0.0$)



Imperfection 0.1%의 시각력 곡선 (감쇠)
 PL_1 Pre-buckling (Load Level=0.89, $\mu=0.10$, $h=0.5$)
 PL_2 Pre-buckling (Load Level=0.92, $\mu=0.20$, $h=0.5$)



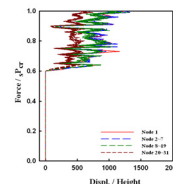
Imperfection 0.1%의 시각력 곡선 (감쇠)
 PL_1 Post-buckling (Load Level=0.96, $\mu=0.10$, $h=0.5$)
 PL_2 Post-buckling (Load Level=1.00, $\mu=0.20$, $h=0.5$)
 <그림 15> Parallel Lamella Dome 시각력 곡선



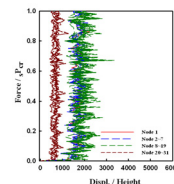
<그림 16> 3-Way Grid Dome 구조물의 형상

<표 8> 3-Way Grid Dome 구조물의 동적좌굴 하중비 (완전형상)

$\mu=0.1$		$\mu=0.2$	
$h=0.0$	$h=0.05$	$h=0.0$	$h=0.05$
0.61	0.95	-	-

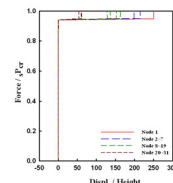


(a) $\mu=0.10$

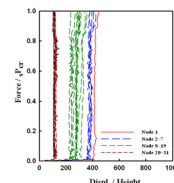


(b) $\mu=0.20$

<그림 17> 3-Way Grid Dome 완전형상 $h=0.0$



(a) $\mu=0.10$



(b) $\mu=0.20$

<그림 18> 3 Way Grid Dome 완전형상 $h=0.05$

3.3 3-Way Grid Dome 구조물의 구조불안정 특성

본 장에서는 3-Way Grid Dome 구조물의 불안정 거동 특성을 알아본다. 라이즈-스팬(μ)비 및 하중조건에 따른 불안정 거동을 파악하고, 형상불완전성을 고려하여 스페이스 프레임 구조물이 불안정 거동과 민감함을 알아본다.

3-Way Grid Dome 구조물형상은 <그림 15>와 같으며, 모델의 모든 절점은 구면상에 존재 한다. 2~7번 절점, 14~19번 절점은 구면 중심으로부터 동일한 각도에 존재 한다. 해석 모델은 <표 8>과 같이 높이에 따라 두 가지 모델 3W_1과 3W_2를 선택 한다.

<표 7> 3-Way Grid Dome 구조물의 해석 모델

Model	L1	L2	H	H1	H2	H3	μ	θ	$L_{tot}(m)$
3W_1	338	171	100	89	67	55	0.1	7.5	170
3W_2	352	182	200	177	133	107	0.2	14.5	180

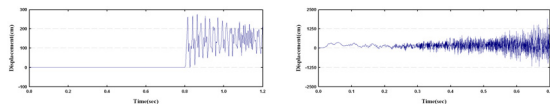
STEP 하중을 받는 경우, 감쇠정수(h) 0.0, 0.05로 하고, 라이즈-스팬(μ)비는 0.1과 0.2로 변화시켜 각 하중레벨의 시각력 곡선으로 부터 얻을 수 있는 최대 변위응답을 <그림 17>과 <그림 18>에 나타낸다. <표 8>는 좌굴하중레벨을 정적좌굴하중으로 규준화 한 값이다. 비감쇠($h=0.0$)일 경우 라이즈-스팬(μ)비에 따라 정적좌굴하중에 $\mu=0.1$ 는 61%이고 감쇠($h=0.05$)일 경우에 $\mu=0.1$ 는 95%이다, 라이즈-스팬(μ)비가 0.2일 때는 Load Level이 1%에서 변위가 발생하는 매우 민감한 반응을 보이고 있어 매우 불안정한 현상을 보인다. 따라서 요소모델을 횡부재의 정식화를 통한 모델링이 필요하다.

비선형 변위응답의 특성을 분석하기 위해

Pre-buckling 및 Post-buckling 레벨에서의 시각력 응답곡선을 비교한다. 라이즈-스팬(μ)비는 $\mu=0.10$ 과 $\mu=0.20$ 로 하고, 감쇠정수는 $h=0.0$ 과 $h=0.05$ 로 한다.

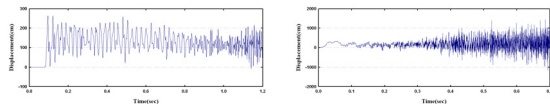
라이즈-스팬(μ)비가 0.10인 경우 Pre-buckling일 경우 일정한 간격을 두고 규칙적인 패턴을 보이고, Load Level 0.61일 경우 일정한 패턴을 보이다가 0.8초에 뛰면서 불규칙적인 패턴을 보인다. Post-buckling일 경우에는 진폭이 한번 뛰면서 불규칙적인 패턴을 보인다. 라이즈-스팬(μ)비가 $\mu=0.20$ 인 경우에는 3-Way Grid Dome은 민감한 반응을 보이기 때문에 Pre-buckling과 Post-buckling모두 불규칙한 변위를 보인다.

감쇠정수 $h=0.05$ 를 도입한 경우 감쇠의 효과로 인한 변위의 진폭이 감소함을 알 수 있지만 라이즈-스팬(μ)비가 높으면 모델이 민감하기 때문에 휨을 고려한 해석이 필요하다.



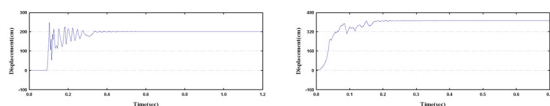
완전형상의 시각력 곡선 (비감쇠)

3W_1 Pre-buckling (Load Level=0.61, $\mu=0.10$, $h=0.0$) 3W_2 Pre-buckling (Load Level=0.86, $\mu=0.20$, $h=0.0$)



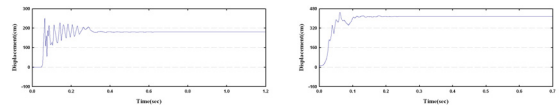
완전형상의 시각력 곡선 (비감쇠)

3W_1 Post-buckling (Load Level=0.87, $\mu=0.10$, $h=0.0$) 3W_2 Post-buckling (Load Level=1.00, $\mu=0.20$, $h=0.0$)



완전형상의 시각력 곡선 (감쇠)

3W_1 Pre-buckling (Load Level=0.95, $\mu=0.10$, $h=0.05$) 3W_2 Pre-buckling (Load Level=0.70, $\mu=0.20$, $h=0.05$)



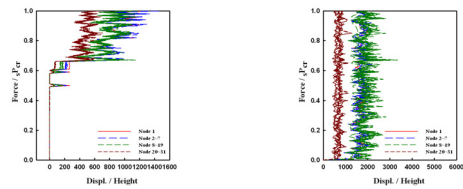
완전형상의 시각력 곡선 (감쇠)

3W_1 Post-buckling (Load Level=1.00, $\mu=0.10$, $h=0.05$) 3W_2 Post-buckling (Load Level=1.00, $\mu=0.20$, $h=0.05$)

<그림 19> 3 Way Grid Dome 시각력 곡선

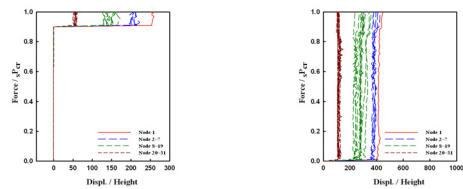
<표 9> 3 Way Grid Dome 구조물의 동적좌굴 하중비 (Imperfection 0.1%)

$\mu=0.1$		$\mu=0.2$	
$h=0.0$	$h=0.05$	$h=0.0$	$h=0.05$
0.50	0.91	-	-



(a) $\mu=0.10$ (b) $\mu=0.20$

<그림 20> 3 Way Grid Dome Imperfection 0.1% $h=0.0$



(a) $\mu=0.10$ (b) $\mu=0.20$

<그림 21> 3 Way Grid Dome Imperfection 0.1% $h=0.05$

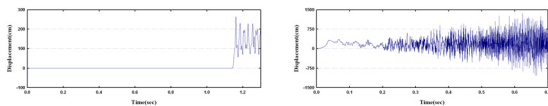
초기형상불완전성을 고려한 불안정 거동을 분석한다. STEP 하중을 받는 경우, 감쇠정수(h) 0.0, 0.05로 하고, 라이즈-스팬(μ)비는 0.1과 0.2로 변화시켜 각 하중레벨의 시각력곡선으로 부터 얻을 수 있는 최대 변위응답을 <그림 20>과 <그림 31>에 나타낸다. <표 9>는 좌굴하중레벨을 정적좌굴하중으로 규준화 한 값이다. 비감쇠($h=0.0$)일 경우 라이즈-스팬(μ)비에 따라 정적좌굴하중에 $\mu=0.1$ 는 50%이고, 감쇠($h=0.05$)일 경우에 $\mu=0.1$ 는 91%이다. 라이즈-스팬(μ)비가 0.2일 때는 Load Level이 1%에서 변위가 발생하는 매우 민감한 반응을 보이고 있어 매우 불안정한 현상을 보인다. 따라서 요소모델을 휨

부재의 정식화를 통한 모델링이 필요하다.

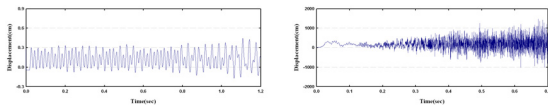
비선형 변위응답의 특성을 분석하기 위해 Pre-buckling 및 Post-buckling 레벨에서의 시각력 응답곡선을 비교한다. 라이즈-스팬(μ)비는 $\mu=0.10$ 과 $\mu=0.20$ 로 하고, 감쇠정수는 $h=0.0$ 과 $h=0.05$ 로 한다.

모델이 매우 민감하기 때문에 Perfection 모델과 같은 현상을 보이는 것을 알 수 있다.

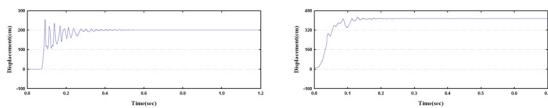
감쇠정수 $h=0.05$ 를 도입한 경우 감쇠의 효과로 인한 변위의 진폭이 감소함을 알 수 있다.



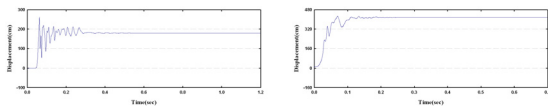
Imperfection 0.1%의 시각력 곡선 (비감쇠)
3W_1 Pre-buckling (Load Level=0.50, $\mu=0.10$, $h=0.0$)
3W_2 Pre-buckling (Load Level=0.69, $\mu=0.20$, $h=0.0$)



Imperfection 0.1%의 시각력 곡선 (비감쇠)
3W_1 Post-buckling (Load Level=0.67, $\mu=0.10$, $h=0.0$)
3W_2 Post-buckling (Load Level=1.00, $\mu=0.20$, $h=0.0$)



Imperfection 0.1%의 시각력 곡선 (감쇠)
3W_1 Pre-buckling (Load Level=0.91, $\mu=0.10$, $h=0.5$)
3W_2 Pre-buckling (Load Level=0.89, $\mu=0.20$, $h=0.5$)



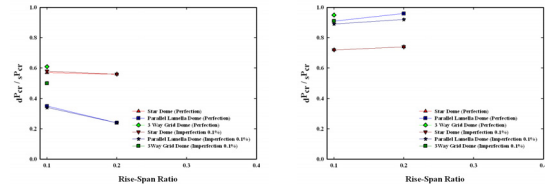
Imperfection 0.1%의 시각력 곡선 (감쇠)
3W_1 Post-buckling (Load Level=1.00, $\mu=0.10$, $h=0.5$)
3W_2 Post-buckling (Load Level=1.00, $\mu=0.20$, $h=0.5$)

〈그림 22〉 3 Way Grid Dome 시각력 곡선

4.4 래티스 돔 구조물의 동적 불안정 특성 비교

본 절에서는 래티스 돔 구조물의 동적 불안정 특

성을 비교하기 위해 앞 절에서 해석한 결과를 비교 분석한다. 래티스 돔 구조물의 경우 형태에 따라 요소의 길이가 다르게 된다. 불안정 특성의 비교는 돔 구조물의 전체 요소길이를 기준으로 하며, 정적좌굴 하중을 규준화한 값을 라이즈-스팬(μ)비와 초기형상불완전성을 가지고 감쇠와 비감쇠로 나누어 비교 분석한다.



(a) $h=0.0$ (b) $h=0.05$

〈그림 2〉 라이즈-스팬(μ)비에 따른 동적좌굴하중 비교

래티스 돔 구조물의 불안정 특성의 비교결과 3-Way Grid Dome은 매우 민감하게 반응을 하며 휨을 고려한 해석이 필요함을 알 수 있다. 라이즈-스팬(μ)비가 높아지면 능력이 감소함을 알 수 있다.

5. 결론

스페이스 프레임의 구조불안정 문제는 구조물의 여러 가지 초기조건에 따라 매우 민감하게 반응한다. 본 연구에서는 그리드 분할 방법에 따른 스페이스 프레임의 동적 구조불안정 특성을 조사하였다. 이를 위해 간단한 2-자유절점 구조물을 통해 스페이스 프레임의 붕괴 메커니즘을 먼저 파악하고, 일반적으로 많이 사용되는 Star Dome, Parallel Lamella Dome, 3-Way Grid Dome을 모델로 선택하여 라이즈-스팬(μ)비 및 형상불완전에 따른 불안정 거동 특성을 알아보았다. 연구결과를 조사 분석하면 다음의 결론을 얻었다.

1. 돔의 외력이 동적으로 작용하는 경우에는, 감쇠가 없으면 동적좌굴하중이 정적좌굴하중의 60% 이하로 낮아짐을 알 수 있다.
2. 비감쇠가 적용된 경우, Parallel Lamella Dome 보다 Star Dome이 정적좌굴하중에 대한 동적좌굴하중 효율이 더 높다. 또 라이즈-스팬(μ)비가

- 높아지면 좌굴능력이 약간 감소함을 알 수 있다.
3. 감쇠가 적용된 경우, Star Dome보다 Parallel Lamella Dome이 정적좌굴하중에 대한 동적좌굴 하중 효율이 더 높다. 또 라이즈-스팬(μ)비가 높아지면 좌굴능력이 약간 증대함을 알 수 있다.
 4. 전체적으로 비감쇠보다 감쇠를 도입한 경우에는 동적좌굴하중에 대한 효율이 높아짐을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(과제번호 #06 건설핵심B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 金勝德, “偏平構造物の動的安定に関する研究,” 東京大學 大學院, 博士學位論文, 1990.
2. Kim, S. D., Tanami, T. and Hangai, Y. “Direct and indirect snapping behaviors of shallow truss truss models,” Bull. ERS, No.23, 1990, pp.73-86
3. Kim, S.D., “On The Characteristic of Indirect Snapping of Shell-Like Structures,” The 9th Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures, 2009, Nagoya, Japan, pp.5-6.
4. 김남석, 장제필, 김승덕, “스페이스 트러스구조물의 라이즈-스팬, 하중비 및 초기 형상불안정성에 따른 분기좌굴 특성에 관한 연구,” 한국공간구조학회지, Vol. 9, No. 5 2010, pp.127-134.
5. 김두리, 김남석, 김승덕, “기하학적 비선형을 고려한 얇은 스페이스 트러스 구조물의 동적 좌굴 거동 분석,” 한국공간구조학회 춘계학술발표회 논문집, 제6권 제1호 2010, pp.25-30
6. 김두리, “스페이스 트러스 구조물의 동적좌굴 특성에 관한 연구” 세명대학교 대학원, 석사학위논문, 2010
7. 김승덕, 김두리, “정현파 하중을 받는 EP(Elliptic Paraboloidal)셸 구조물의 동적 불안정 특성 분석,” 한국공간구조학회지, Vol. 9, No. 5 2010, pp.127-134.
8. 김남석, 이신우, 김승덕 “레티스 돔 구조물의 정적 구조불안정 특성에 관한 연구,” 한국공간구조학회 춘계학술발표회 논문집, 제7권 제1호 2010, pp.41-46

(접 수 일 자 : 2011년 10월 18일)

(심사완료일자 : 2012년 02월 01일)

(게재확정일자 : 2012년 02월 24일)